

## 薄膜センサによる微流速・流向計測法の研究

北山 正文\*・川畑 敬志\*・田中 武\*  
沖田 貞文\*\*・橋本 忠洋\*\*\*

(平成 9 年 9 月 4 日受理)

### A Study on the Measuring Methods of Low Flow Velocity and Direction Using A Thin Film Sensor

Yoshifumi KITAYAMA, Keishi KAWABATA, Takeshi TANAKA,  
Sadafumi OKITA and Tadahiro HASHIMOTO

(Received Sept. 4, 1997)

#### Abstract

Recently, the research on the underground water pollution has been done for preventing the sudden increase of underground water pollution.

There is the measurement of flow velocity and direction in this research items, and the establishment of practical methods for measuring its flow velocity and direction at a very slow range has been desired earnestly.

The authors have suggested the measuring methods of flow velocity and direction by using a single type probe, but it is impossible to measure the flow velocity and direction simultaneously. In this paper, we have described the simultaneous measuring methods of flow velocity and direction by using a thin film sensor that we have devised newly, and show the deciding methods of a measurable range.

From the experimental results, we could confirm that the simultaneous measuring methods of flow velocity and the 16 compass directions is possible using a thin film sensor that we have devised at the range of flow velocity 0.2~13[mm/sec].

**Key Words:** Thin film sensor, Ion layer, Weak electrolyte, Very slow flow velocity, Flow direction

#### 1. 緒 言

近年、工場排水・生活排水の排水処理施設等の不備、農業やゴルフ場の乱開発等による地下水の汚染、および、ハイク汚染が社会的問題として扱われることが急増し、それに伴い地下水汚染防止のための環境調査

が広く行われている。

この調査項目の中に地下水の流速、流向計測があり、低流速域における実用的な計測法の確立が強く望まれている。

これまでに、筆者らは単針形探針を用いた計測法を提案し<sup>1)~10)</sup>、また、測定領域の拡大を目標として、

\* 広島工業大学工学部電子工学科

\*\* 広島オプト株式会社

\*\*\* 広島工業大学大学院工学研究科電子工学専攻

センサ部に薄膜を用いた計測法を提案してきた<sup>11), 12)</sup>。

本論文では、これらの成果をもとに、さらに高性能化するために、流速、流向を同時測定する計測法、すなわち、薄膜センサによる計測法、および、流速測定領域上限の決定法について提案する。

## 2. 測定原理

Fig. 1 に薄膜センサの構造を示す。このセンサは、中心にイオン発生・流速検出電極、その周囲に16個の流向検出電極を配置し、さらに、ベース電極から構成されている。また、センサの製作に際し、耐水性の薄膜を容易に形成できる手法、すなわち、円板ガラス基板（コーニング7059ガラス）上にスピコート法により Au ベースト（粘度 85[cps]）を塗布し、これを焼成した金薄膜で、さらに、フォトリソグラフィにより電極パターンの形成法を開発した。しかも、イオン発生・流速検出電極、および、流向検出電極に関しては、微流速領域において、境界層の乱れが発達しないように、表面状態を形成するように留意した。

本測定法は、単針形探針の測定原理<sup>1)</sup>と同様に、弱電解液中で電極表面にイオン層を発生させ、このイオン層が流れと共に流れ去るときに起こる現象を利用するものである。イオン発生・流速検出電極とベース電極間に直流電圧 2.5～3[V] を印加すると、イオン発生・流速検出電極上にイオン層が発生する。このイオン層は各電極間インピーダンスにその場の状況に応じた再現性のある影響を及ぼすため、その変化を以下に示す方法で微流速・流向の計測に利用する。

### 2.1 流速測定原理

弱電解液中に Fig. 1 の薄膜センサをセットして、直流電圧を印加することにより、イオン層を発生させた後、直流電圧を遮断すると、イオン層は流れと共に流れ去る。このとき、イオン発生・流速検出電極とベース電極間のインピーダンスが変化するので、この電極間に交流電圧を印加し、インピーダンス変化を電圧変化に変換すると、Fig. 2 に示すような出力が得られる。基準電圧  $V_s$  は測定開始前の出力電圧で、流体の電導率  $\sigma$  との間には、次式の関係がある<sup>4), 6), 9), 10)</sup>。

$$\sigma = a_1 V_s + b_1 \quad (1)$$

また、 $V_o$  は直流電圧が印加されているときの出力電圧で、一定値を取る。

直流電圧遮断から時刻  $t_1$ ,  $t_2$  後の出力電圧を  $V_1$ ,  $V_2$  とすると、流速測定に用いる電圧減衰割合  $W$  は、次式のように表すことができる。

$$W = \frac{|dV|}{|dt|} = \frac{|V_1 - V_2|}{|t_1 - t_2|} \quad (2)$$

また、微流速域においては、流速  $U$  と電圧減衰割合  $W$  との間には、比例関係があることが確認されており<sup>1)~12)</sup>、この流速域においては、流速  $U$  を次式のように  $W$  の関数として表すことができる。

$$U = pW + q \quad (3)$$

ここで、(3)式の  $p, q$  は電極形状、回路、および、

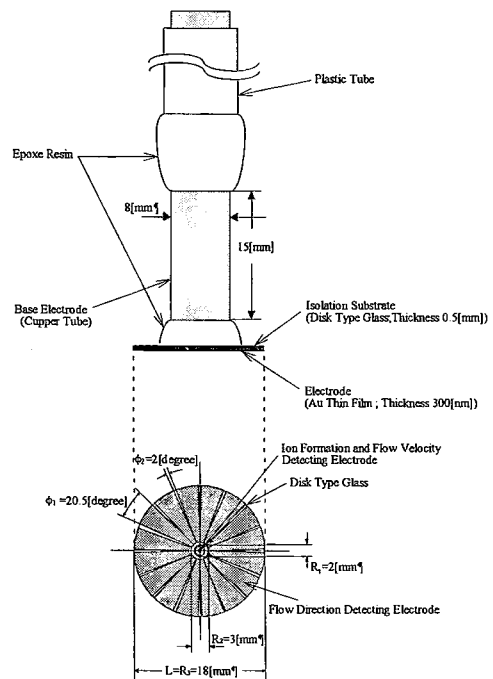


Fig. 1 Structure of sensor

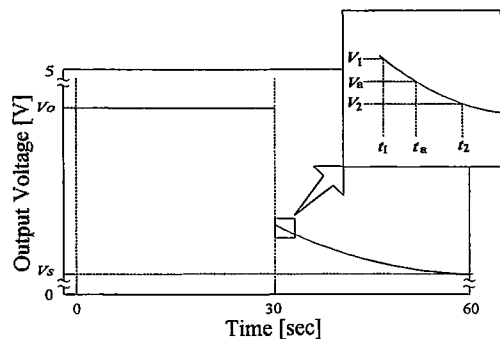


Fig. 2 Schematic of measurement principle for flow velocity (example of output signal)

対象流体の電導率  $\sigma$  によって決まる定数であり、次式のように表される。

$$\begin{cases} p = a_2\sigma + b_2 \\ q = a_3\sigma + b_3 \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 流向測定原理

流速測定のために発生させたイオン層は、下向きにセットされた電極面に沿って流れの方向へ押し流される。このとき、各流向検出電極とベース電極間のインピーダンスがイオン層の移動に伴って変化する。そこで、この各電極間に交流電圧を印加し、インピーダンス変化を電圧変化に変換する。流れ方向下流に位置する電極とベース電極間での出力電圧は Fig. 3 に示すように変化する。この電圧増加量  $\Delta V$  (直流電圧印加前の電圧と直流電圧遮断直前の電圧との差) の最も大きい電極が位置する方向を流向とすることができ、16 方位で流向検出が可能である。

## 3. 実験装置

Fig. 4, Photo. 1 に本実験で用いた実験装置を示す。この装置は、パルスモータ①により等速で移動する台車②に取り付けたセンサ③が、水槽④内の静止流体中を等速で移動することによって、センサに対する模擬的な微流速・流向流体を再現できるものである。

このような実験装置は、台車が走行した後、流体が静止するまでの待ち時間が非常に長くなる。しかし、流速・流向の標準値としては、非常に信頼性が高いものである。

なお、静止流体には水道水を用い、電導率、および、水温は電導率計⑤、水温計⑥によって測定する。

そして、センサのイオン発生・流速検出電極とベ-

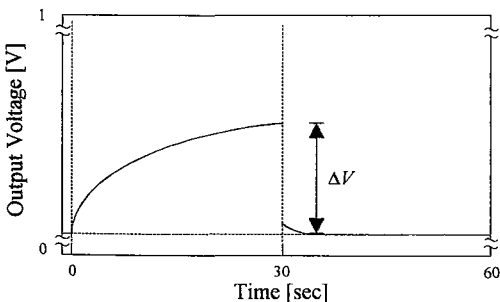


Fig. 3 Schematic of measurement principle for flow direction  
(example of output signal)

ス電極間に直流電圧を印加する際の ON・OFF に使用するリレーは、PIO ボードを用いて、また、台車を移動させるためのパルスモータは、PMC ボード、モータドライバーを用いて、それぞれパソコンにより制御を行う。センサからの信号は、それぞれ測定回路によって信号処理を行い、A/D 変換ボードで A/D 変換してパソコンに取り込む。

## 4. 測定原理確認実験

### 4.1 流速測定実験方法とその結果

Fig. 4 の実験装置を用いて、0~16[mm/sec] の範囲の流速  $U$  に対する電圧減衰割合  $W$  の測定を行った。電圧減衰割合  $W$  は、単針形探針の場合<sup>1)~10)</sup>と同様に、電圧取得の際、ばらつきがあるため、最小二乗法を適用して補正を行った。ここで、流速  $U$  は台車の移動速度であり、一定距離を移動する際に要した時間から求めた値である。また、実験に関しては、台

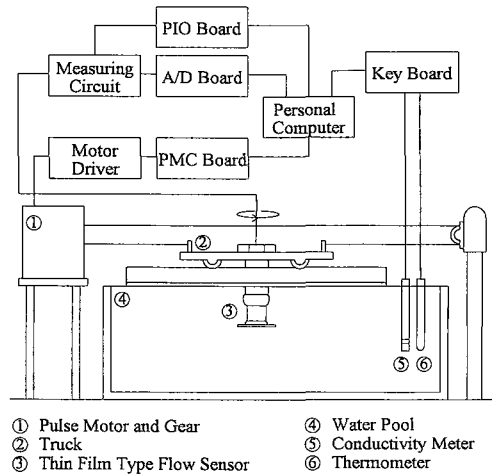


Fig. 4 Experimental apparatus

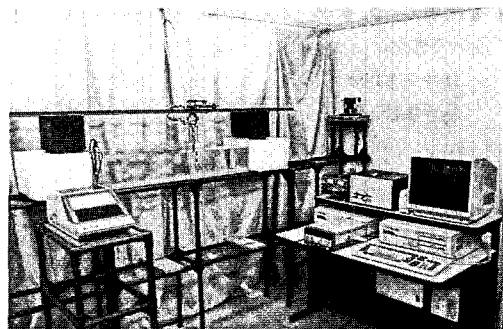


Photo. 1 Experimental apparatus

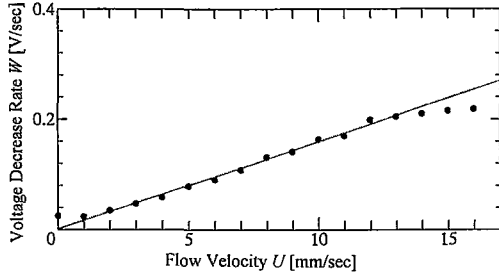


Fig. 5 Example of voltage decrease rate  $W$  as a function of flow velocity  $U$

車が走行した後、流体が静止するまでの待ち時間を十分取って行った (20~40[ $\text{min}$ ] 程度)。

Fig. 5 に流速  $U$  に対する電圧減衰割合  $W$  の測定結果の一例を示す。この結果より、流速 0~13[ $\text{mm/sec}$ ] の範囲において、流速  $U$  と電圧減衰割合  $W$  との間には比例関係があることが分かる。したがって、この流速域においては、電圧減衰割合  $W$  の測定によって、流速  $U$  を(3), (4)式を用いることにより得ることができる。

流速 13[ $\text{mm/sec}$ ] 以上の流速域においては、流速変化に無関係に電圧減衰割合  $W$  の飽和が起こるため、(3), (4)式を適用できない。したがって、本流速測定法における測定領域の上限は流速 13[ $\text{mm/sec}$ ] 程度である。

流速 13[ $\text{mm/sec}$ ] 以上の流速域における電圧減衰割合  $W$  の飽和の要因については、第 6 章において述べる。

また、(3)式に示した  $p, q$  と電導率  $\sigma$  の関係を得るために、電導率は 8.49~9.98[ $\text{mS/m}$ ]、流速は 0~13.02[ $\text{mm/sec}$ ] の範囲で実験を行った。なお、電導率  $\sigma$  は、電導率計で測定した。これらの結果に対して最小二乗法を適用し、(4)式の係数  $a_2, a_3, b_2, b_3$  を決定し、 $p, q$  と  $\sigma$  の関係を(5)式のように表すことができた。

$$\begin{cases} p = -1.06\sigma + 73.3 \\ q = 0.15\sigma - 1.68 \end{cases} \quad (5)$$

#### 4.2 流向測定実験方法とその結果

Fig. 4 の実験装置を用いて、各流向検出電極の電圧増加量  $\Delta V$  の測定を、次に示すような方法で流速測定と同時にを行った。

なお、各流向検出電極の番号、および、流向  $\theta_{FD}$  は、Fig. 6 に示すように定義した。

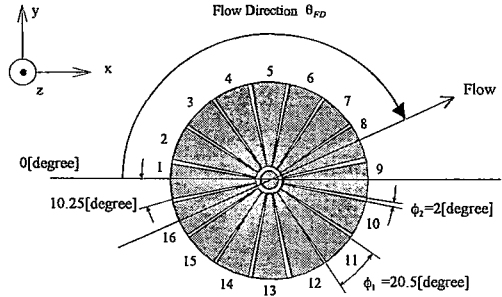


Fig. 6 Relation between the direction of flow detecting electrodes and flow direction  $\theta_{FD}$

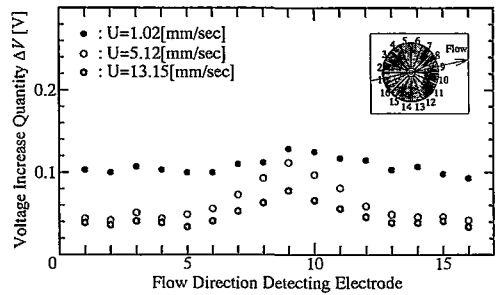


Fig. 7 Voltage increase quantity  $\Delta V$  vs. electrode by detecting at flow direction  $\theta_{FD} = 0 \sim 360[\text{degree}]$

流れが流向検出電極番号 1 から 9 の方向、すなわち、流向  $\theta_{FD} = 180[\text{degree}]$ 、流速  $U = 1.02, 5.12, 13.15[\text{mm/sec}]$  における各流向検出電極に対する電圧増加量  $\Delta V$  の測定結果の一例を Fig. 7 に示す。この結果より、流れの下流に配置されている流向検出電極 (電極番号 9) において、電圧増加量  $\Delta V$  は最大値を示していることが分かる。

したがって、流速  $U$  が 1.02~13.15[ $\text{mm/sec}$ ] の範囲において、電圧増加量  $\Delta V$  の最大値から、ほぼ 16 方位程度の流向を流速計測と同時に検出することが可能であることが確認できた。

しかしながら、流速  $U$  が 5.12[ $\text{mm/sec}$ ] のときに比べて 1.02[ $\text{mm/sec}$ ] のときは、電圧増加量  $\Delta V$  の最大値を検出した電極とその他の流向検出電極の  $\Delta V$  の値との差が小さいことから、流速が更に遅い領域では、流向測定に限界が生ずると考えられる。

## 5. 測定精度

### 5.1 流速測定精度

本微流速測定法における測定精度検証実験として、台車が移動する速度（流速標準値）と薄膜センサを用いて電圧減衰割合  $W$  を測定し、(3), (5)式を用いて求めた流速との比較を行った。その結果を Fig. 8 に示す。この結果から、流速が 1.02~13.02[mm/sec] の範囲において、誤差  $\pm 20\%$  以内で測定が可能であることが示された。流速 0[mm/sec] 附近において、誤差が大きくなる原因としては、イオン層の拡散、および、静止流体であるべき流体の対流等が考えられる。

### 5.2 流向測定精度

電圧増加量  $\Delta V$  を用いた流向測定に関して、流速を 1, 5, 9, 13[mm/sec] の4種類に設定し、それぞれの流速について、10回ずつ計40回の実験を行い、測定精度検証として、流向判別率で検討した結果を

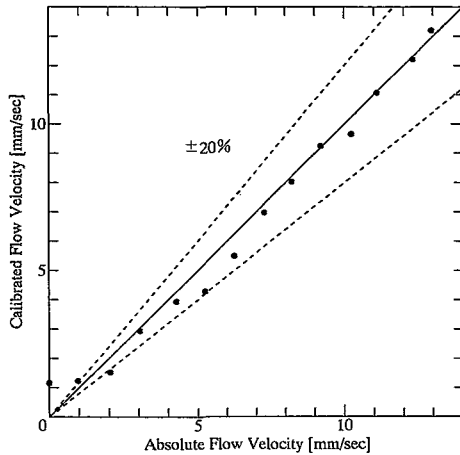


Fig. 8 Relation between absolute and calibrated flow velocity at  $\sigma=9.45[\text{mS/m}]$

Table 1 Distinguishing ratio of flow direction

Setting Velocity [mm/sec]	The Number of Experiments	The Number of Distinction	Ratio of Distinction [%]
1	10	7	70
5		10	100
9		10	100
13		10	100

Table 1 に示す。この結果から分かるように流速 1[mm/sec] においては、流向判別率は 70[%] に留まっているものの、その他の流速においては、判別率 100[%] となっている。この結果から流速が遅くなるほど誤差が大きくなることが分かる。

## 6. 流速測定領域上限について

本章では、イオン層の状態の観察から電圧減衰割合  $W$  飽和の要因、および、流速測定領域上限の決定法について述べる。

4.1 において述べたように、本流速計測法では、流速 13[mm/sec] 程度以上の流速域において、電圧減衰割合  $W$  が飽和する傾向があり、(3), (4)式を適用できない。この電圧減衰割合  $W$  の飽和は、イオン層の発生状態、および、流れ去る状態が流速 13[mm/sec] 程度までの流速域における状態と異なるためであると考えられる。

ここで、イオン発生・流速検出電極の中心位置におけるイオン層厚さ  $\delta_{ion}$  と  $x$  方向の速度  $u$  との関係は、Pohlhausen の層流速度分布形状式<sup>(3), (4)</sup>

$$\frac{u}{U} = \frac{1.5}{4.64} \frac{\delta_{ion}}{\sqrt{\nu x/U}} - \frac{1}{2 \cdot (4.64)^3} \frac{\delta_{ion}^3}{(\sqrt{\nu x/U})^3} \quad (6)$$

ただし、 $u$  : 局所流速 [mm/sec]

$U$  : バルク流速 [mm/sec]

$\delta_{ion}$  : イオン層厚さ [mm]

$\nu$  : 水の動粘度

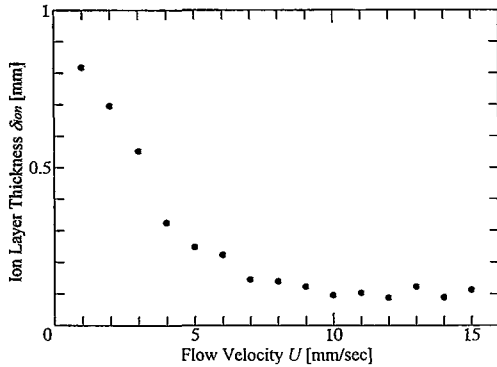
(20°C において  $1.0038 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{S}]$ )

$x$  : イオン発生・流速検出電極の中心位置 (9[mm])

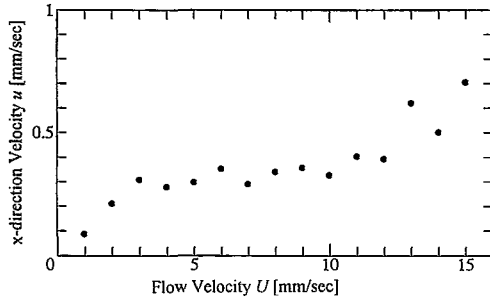
を用いて検討した。

### 6.1 電圧減衰割合 $W$ 飽和の要因

各流速の流れ場において、イオン発生・流速検出電極の中心位置におけるイオン層厚さ  $\delta_{ion}$  の値を用いて、イオン層の発生状態について考察する。イオン層厚さ  $\delta_{ion}$  は、pH 指示薬（メチルレッド溶液）を用いて、イオン層を可視化し、これを写真撮影し、同じ画面に写ったベース電極である銅管の直径 8[mm] を用いて、その比から求めた。流速  $U$  に対するイオン層厚さ  $\delta_{ion}$  の測定結果の一例を Fig. 9 に示す。この結果より、イオン発生・流速検出電極の中心位置におけるイオン層厚さ  $\delta_{ion}$  は、流速の増加に伴って減少していることが分かる。しかも、流速 13[mm/sec] 程度以上の流速域において、イオン層厚さ  $\delta_{ion}$  の値にばらつきが生じている。



**Fig. 9** Variation of ion layer thickness  $\delta_{ion}$  (as the center of disk type glass) with flow velocity  $U$  (glass size  $L=18$ [mm])



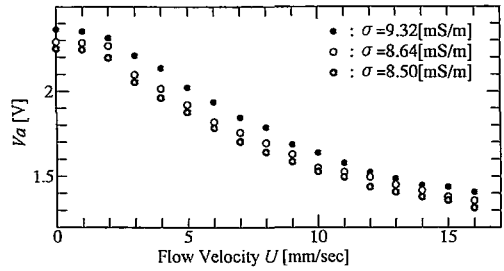
**Fig. 10** Velocity  $u$  at ion layer thickness  $\delta_{ion}$  with flow velocity  $U$

次に、各流速の流れ場において、各流速におけるバルク流速  $U$  に対するイオン発生・流速検出電極の中心位置でのイオン層厚さ  $\delta_{ion}$  の位置における  $x$  方向の速度  $u$  の測定結果から、イオン層の流れ去る状態について測定した。その測定結果の一例を Fig. 10 に示す。この結果より、流速 13[mm/sec] 程度以上の流速域において、 $x$  方向の速度  $u$  の傾向に変化があることが分かる。

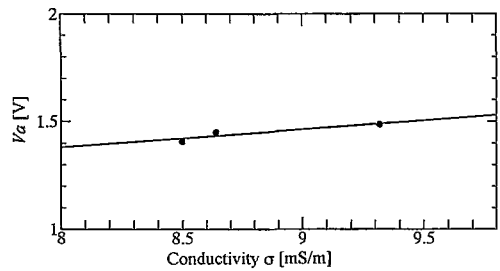
これらのことから、電圧減衰割合  $W$  飽和の要因としては、イオン層の発生状態が流速 13[mm/sec] 程度を境に異なること、および、バルク流速  $U$  が大きくなると、イオン層厚さ  $\delta_{ion}$  程度内の速度  $u$  の傾向に変化があるということをあげることができる。

## 6.2 流速測定領域上限の決定法

前述のように、流速測定に用いている電圧減衰割合  $W$  は、流速 13[mm/sec] 程度以上になると飽和する



**Fig. 11** Relation between  $V_a$  and flow velocity  $U$



**Fig. 12** Relation between  $V_a$  and conductivity  $\sigma$  at  $U=13$ [mm/sec]

傾向にあり、これ以上の流速域では、本論文で提案した測定原理では流速測定が不可能である。本測定法を実用化する上では、測定開始前に、流速測定が可能な流速域かどうかの判別が必要とされる。

測定上限流速を判別する方法<sup>9)</sup>として、イオン層形成のための直流電圧遮断から 1[sec] 後における出力電圧  $V_a$  に着目し、流速  $U$  に対する出力電圧  $V_a$  の測定を行った。その結果の一例を Fig. 11 に示す。この結果より、流速  $U$  の増加に対して、出力電圧  $V_a$  は単調減少傾向を示し、電導率  $\sigma$  が上がると出力電圧  $V_a$  も上がることが分かる。また、Fig. 12 のように、流速 13[mm/sec] において、電導率  $\sigma$  と出力電圧  $V_a$  との間には、次式のような比例関係がある。

$$V_a = 0.08\sigma + 0.73 \quad (7)$$

これらのことを用いて測定領域判別を行うには、まず、測定開始時に、測定対象流体の基準電圧  $V_s$  を測定し、この値を用いて、(1)式によって電導率  $\sigma$  の値を求め、(7)式によって求めた出力電圧  $V_a$  の値が、Fig. 11 の流速  $U$  が 13[mm/sec] のときの値より大きいかどうかを判別し、しきい値以上であれば、測定対象流体の流速は、適応範囲内にあると判定することができる。なお、今回使用した実験装置では、(1)式の  $a_1=7.64$ ,

$b_1=1.40$  であった。

## 7. 結 言

以上のことから、本計測法により、 $1.02\sim 13.02$  [mm/sec] の範囲において、流速測定については  $\pm 20[\%]$  の誤差範囲内で、また、流向測定については16方位程度の流向を、同時に測定可能であることが分かった。また、以前に提案した単針形探針による計測法に比べて、測定時間が圧倒的に短くなる。したがって、ある程度の流向・流速変化が時間経過とともにある場合も、微流速・流向の測定が可能になった。

さらに、流速測定領域上限について、イオン層の発生状態が流速  $13$  [mm/sec] 程度を境に異なること、および、バルク流速  $U$  が大きくなると、流速  $U$  が変化することとはあまり関係なく、イオン層厚さ  $\delta_{ion}$  程度内の速度  $u$  の傾向に変化があるということが分かった。

また、本計測法では、流速測定に上限が生じるが、その上限値は、直流電圧遮断から  $1$  [sec] 後における出力電圧  $V_a$  より判別が可能である。

今後は、極低流速域における流速・流向測定の精度向上、測定領域の拡大、および、耐水性の更なる向上について検討する予定である。

最後に、本論文を書き終わるにあたり、実験、および、データ処理に協力いただいた広島工業大学工学部電子工学科北山・川畑両研究室の学生諸君に心より謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 玉野和保, 北山正文: 単針形探針による弱電解液の流速測定法, 計測自動制御学会論文集, 11-4, 469/472 (1975)
- 2) 玉野和保, 砂田謙二, 北山正文: 単針形探針による流速計の流向測定への応用, 計測自動制御学会論文集, 15-2, 273/274 (1979)
- 3) 玉野和保: 探針による弱電解液の流速測定法 I, 広島工業大学研究紀要, Vol. 15, 67/73 (1981)
- 4) 北山正文, 宮本和行: 地下水流速・流向計測法の開発研究, 第7回センシングフォーラム予稿集, 97/100 (1990)
- 5) 北山正文, 宮本和行: 地下水流速・流向測定法の測定精度について, 第29回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 155/156 (1990)
- 6) 北山正文, 宮本和行: 地下水流速測定法の較正法について, 第30回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 287/288 (1991)
- 7) 北山正文, 宮本和行, 高田雅宏: 微流速流体の流向測定における精度について, 第31回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 509/510 (1992)
- 8) 北山正文, 宮本和行, 高田雅宏: 単針形探針を用いた弱電解液の微小流速, 流向測定法, 広島工業大学研究紀要, Vol. 27, 85/89 (1993)
- 9) Y. Kitayama, M. Takata: Method of Confirming Upper Limitation in Measuring Range on Flow Velocity Measurement of Weak Electrolyte with a Single Type Probe, Proceedings of the 32nd SICE Annual Conference (International Session), 1013/1016 (1993)
- 10) 北山正文, 高田雅宏: 探針による微流速測定における流向, および測定領域上限の決定法, 広島工業大学研究紀要, Vol. 28, 57/64 (1994)
- 11) 北山正文, 川畑敬志, 田中 武, 沖田貞文: 薄膜を用いた弱電解液の微流速・流向センサの開発, 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 53/54 (1993)
- 12) 北山正文, 川畑敬志, 田中 武, 沖田貞文: 薄膜センサを用いた微流速・流向計測法の研究, 第3回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, 164/165 (1994)
- 13) 古屋善正: 流体力学Ⅱ〈粘性流体編〉, 35/57, 共立出版 (1973)
- 14) 浅野康一: エンジニアリング・サイエンス口座16物質移動論, 35/44, 共立出版 (1976)